

既設ポストテンションPC桁のグラウト充填不足に対する補修方法の研究

オリエンタル白石(株)		○井隼 俊也
オリエンタル白石(株)	正会員	堀越 直樹
中日本高速技術マーケティング(株)	正会員	博士 熊谷 紳一郎
デンカ(株)		博士 宮口 克一

Abstract : The PC grout filling defect countermeasure in the post-tensioning system PC structure has recently been reported is carried out several studies. However, measures for a conventional PC grout filling defect, its examination method and construction and control methods, there is a problem. Therefore, the present study was aimed to build a construction and control method for the PC grout re-injection. Moreover, in which chloride ions in existing grout was performed including the experimentally verified for re-injection grout material if it is contained. This paper is to report on these studies.

Key words : PC grout filling defect, Cavity amount estimation, Re-degradation suppression

1. はじめに

ポステン橋のPCグラウトは、①PC鋼材の防食、②PC鋼材とコンクリート部材の一体性を確保する重要な役割を担っている。近年、新設構造物のPCグラウトの充填に対しては、十分な充填率を確保するための材料開発、施工および管理手法の改善等を踏まえて、品質が向上している。しかし、従来のPCグラウトでは、ブリーディングの発生、中間排気孔の未設置、不十分な空隙率なシースの選定、注入時のトラブルなどにより充填不足が生じ、PC鋼材の腐食や破断が、暮坪陸橋¹⁾や妙高大橋²⁾などで報告されている。しかし、ポステン橋のPCグラウト充填状況の調査手法、充填不足に対する再注入方法については、その方法が確立されるにいたっていない。さらに、既存のPCグラウト中に塩化物イオンが含まれていると、再注入PCグラウトとの塩化物イオン含有量等の差異が生じる。その界面部において、既存グラウト中のPC鋼材がアノードとなる濃淡電池が形成され、比較的早期にマクロセル腐食が生じることが懸念されている。文献³⁾では、再注入後のマクロセルによる再劣化対策として、亜硝酸リチウム水溶液（以下LiNO₂と示す）の注入・排出の後、PCグラウト材にLiNO₂を添加しPCグラウト再注入について報告されている。しかし、実施工環境下でのLiNO₂の取扱に対しては、環境省が定める「水質汚濁に関する環境基準」等を遵守して、施工時の流出・漏出等に留意する必要がある。

そこで本文は、既設PCグラウトの充填不足の対策として、PCグラウト再注入時の既存PCグラウトの充填状況の調査およびマクロセル腐食対策について記するものである。

2. 既存PCグラウトの空洞量に関する調査方法の開発

既存PCグラウトの充填状況の調査は、表-1に示す方法を組み合わせて用いられることが多い。また、PCグラウト充填不足部の再注入量を把握することは、PCグラウト再注入施工時の管理指標を設けるためにも重要となる。従来、充填不足部の容量や区間長は、空圧法による推定⁴⁾や検測尺を使用した測定方法⁵⁾によって、調査されていることが多い。この空圧法は、エアコンプレッサーでシース内に空気を送りこみ、その圧力変化と時間の関係により、PCグラウト充填不足部分の体積を推定する方法である。しかし、この空圧法による充填不足容量の推定は、図-1⁴⁾に示されるように、充填不足区間の漏気の影響により、測定誤差が大きいことが確認されている。

表-1 PC グラウト充填調査方法

調査方法	評価内容
放射線透過法	調査位置におけるPCグラウトの充填状況を推定する。
打音振動法	直線配置PC鋼材（横締め等）におけるPCケーブル1本ごとのPCグラウト充填状況を推定する。
広帯域超音波法	調査位置におけるPCグラウトの充填状況を推定する。
インパクトエコー法	
削孔調査	

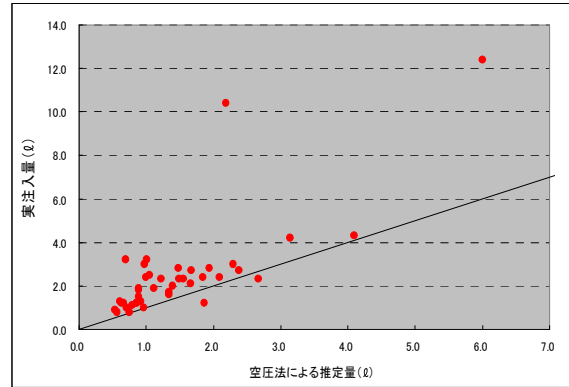


図-1 空圧法における推定量と実注入量の対比⁴⁾

充填不足の体積推定の精度向上を目的として、図-2に示すシステムを用いて、真空容器とシース空洞を連通させ、このときの容器内圧力変化を計測することで、シース内の空気量を推定する手法（真空法）を開発した。本手法の原理は、式(1)に示すボイル・シャルル則によるものである。

$$P1 \cdot \frac{V1}{T1} + P2 \cdot \frac{V2}{T2} = P3 \cdot \frac{V1+V2}{T3} \quad \dots \text{式(1)}$$

ここに、T1：真空容器内温度、T2：充填不足部の温度、T3：導通後の温度、P1：真空容器内の圧力、P2：充填不足部の圧力（＝大気圧）、P3：導通後の圧力、V1：真空容器体積、V2：充填不足部体積

この手法の空洞量推定精度を、写真-1に示す長さ2mおよび4mの亚克力シース（内径38mm）内部にPC鋼棒φ32mmを配置した供試体にて、表-2の試験水準にて検証を実施した。なお、CASE3およびCASE4は、漏気の影響を試験的に模擬したものである。

試験の手順は、真空近くに減圧した10Lの容器と亚克力シース管をφ12mmの耐圧性ブレードホースで繋ぎ、タンクの圧力弁開放前後の圧力変化を0.2秒のインターバルで、前後約10秒間計測した。

表-2 試験水準

CASE	供試体長さ	管内状態	備考
1	2m	密閉	
2	4m	密閉	
3	2m	漏気	φ1mm-1孔(A=0.785m ²) 上端のみ
4	2m	漏気	φ1mm-2孔(A=1.571m ²)

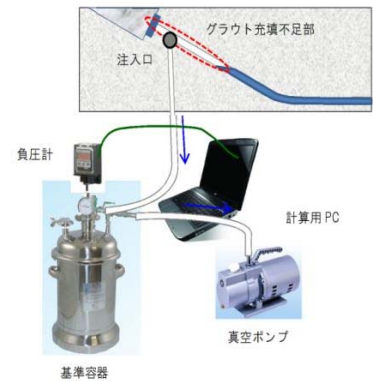


図-2 体積推定システム構成

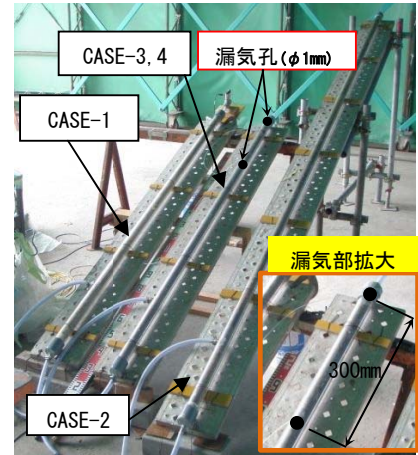


写真-1 供試体形状

計測した圧力弁開放前後の圧力変化より線形近似式を算定した。圧力弁開放前後の圧力変化および線形近似を図-3に示す。この真空時と開放時の線形近似式より、10秒時の導通前後の圧力を算定して、式(1)により充填不足部体積(V2)を推定した。その推定結果を表-3に示す。なお、線形近似の対象とした圧力値は、圧力弁開放直後においては数値にバラつきがみられたため、開放直後1秒間のデータは除外した。実験の結果、この真空法によるシース内空洞量の推定は、漏気の影響を受ける条件であっても、設計値の10%以内の精度であることを確認した。

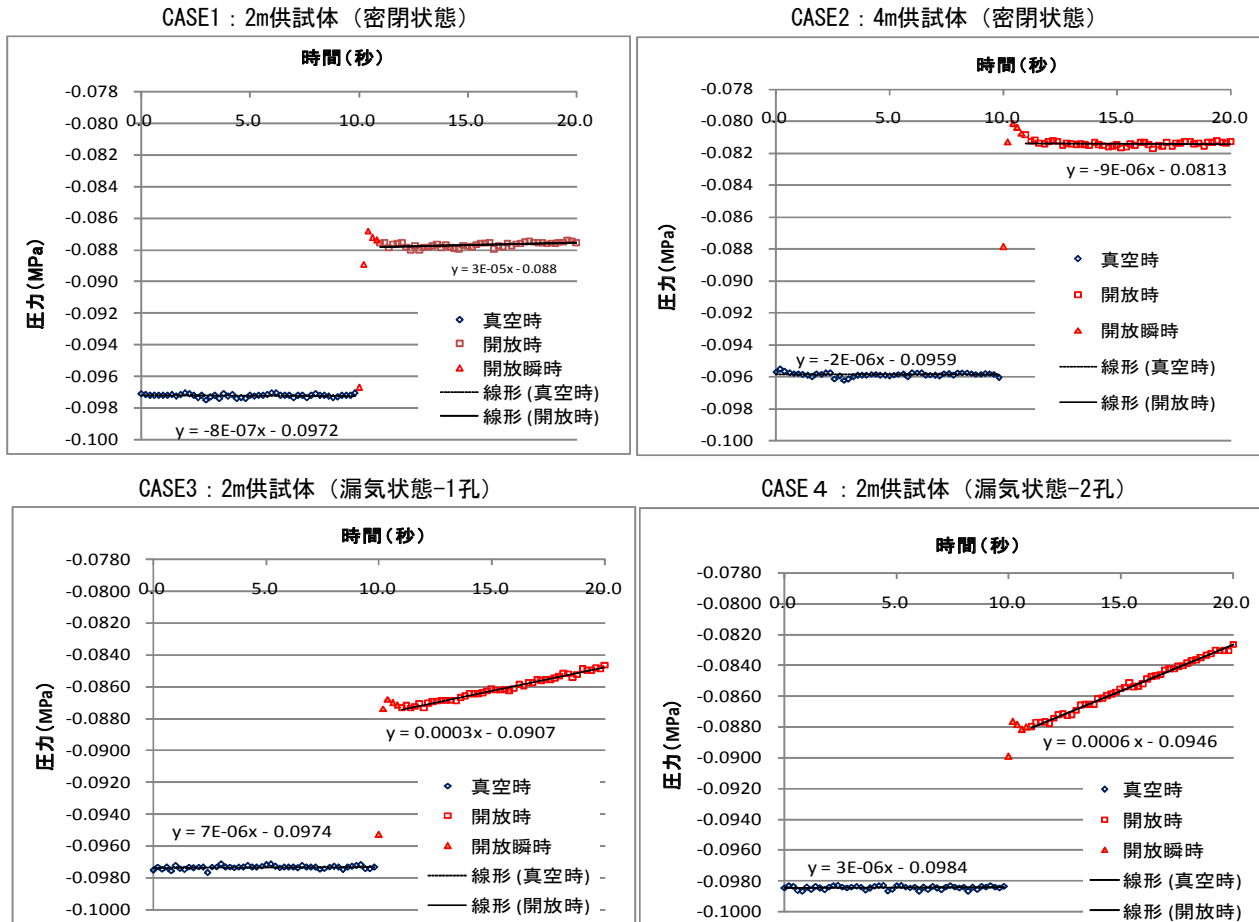


図-3 試験結果 (圧力弁解放前後の圧力変化)

表-3 計測および推定結果

CASE	温度 T1 (°C)	温度 T2 (°C)	温度 T3 (°C)	P1:真空時 圧力(MPa)	P3:開放時 圧力(MPa)	設計値 (ml)	推定値 (ml)	誤差 (%)
1	21.6	22.9	22.4	-0.0972	-0.0879	1069	1105	103
2	21.6	22.9	22.4	-0.0959	-0.0814	1734	1870	108
3	21.6	22.9	22.4	-0.0973	-0.0877	1069	1150	108
4	21.6	22.9	22.4	-0.0984	-0.0885	1069	1168	109

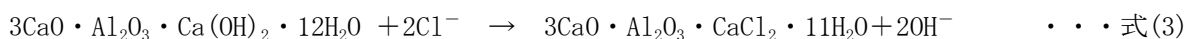
3. 既存PCグラウトの塩化物イオンに対する対策

PCグラウトの再注入では、既設シース内に凍結防止材等に含まれる塩化物イオンがシース内に侵入して、新旧グラウト界面でのマクロセル腐食の発生が懸念される。再注入用のグラウトは、一般に使用されるグラウト材をベースに塩化物イオン固定化剤 (CA₂) を混入させたものを使用し、マクロセル腐食の抑制効果に対する検証を行った。また、比較対象として、腐食抑制剤 (LiNO₂) についても検証を実施した。

3.1 塩化物イオン固定化材 (CA₂) の特徴

(1) 塩化物イオン固定化材のメカニズム⁶⁾

ポルトランドセメント中に塩化物イオン固定化材<CaO・2Al₂O₃>を混和することにより、式(2)および(3)によって hidroカルマイト<3CaO・Al₂O₃・Ca(OH)₂・12H₂O>が多量に生成する。この hidroカルマイトはコンクリート中の塩化物イオンをフリーデル氏塩<3CaO・Al₂O₃・CaCl₂・12H₂O>として固定化して、鋼材腐食の原因となる可溶性塩化物イオンを減少させることができるものである。



(2) 塩化物イオン固定化材 (CA₂) の化学成分, 物理特性

CA₂の化学成分と物理特性を表-4に示す。なお, CA₂については, 亜硝酸リチウムと異なり, 「水質汚濁に関する環境基準」等の制約を受けることはない。

表-4 CA₂の化学成分および物理特性

化学成分 (mass%)							比表面積 (cm ² /g)	比重 (g/cm ³)
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	R ₂ O		
23.96	0.64	67.73	0.01	7.09	0.27	0.21	3,100	2.96

3.2 マクロセル腐食に対する効果検証実験

マクロセル電流は, 分極抵抗や自然電位などの一般的な電気化学的計測が行えない。そこで, 新旧グラウトの打継界面部腐食の定性的傾向を把握するため, 本実験を実施した。

(1) 試験概要

試験は新旧グラウト界面に発生が想定されるマクロセル電流 (腐食電流) に着目する。分割鋼板の間に流れるマクロセル電流 (腐食電流) を評価指標とする。分割鋼板試験体はSS400の32×(10, 20, 30)×13の鋼板6枚で構成され, 各鋼板には2本のリード線を接続し電氣的に結合した。この分割鋼板試験体をグラウト注入孔および排出孔を設けた円筒アクリル管内にセットした。そのあと, 既設グラウトとしてCLを添加したグラウトを試験体高さ1/2まで打設し, 残り1/2部をグラウト充填不良部として考えた。上部にグラウトの注入孔と排気孔を設けたアクリル円筒は, 再注入グラウトを注入して硬化した後解体して, 試験体を暴露した。

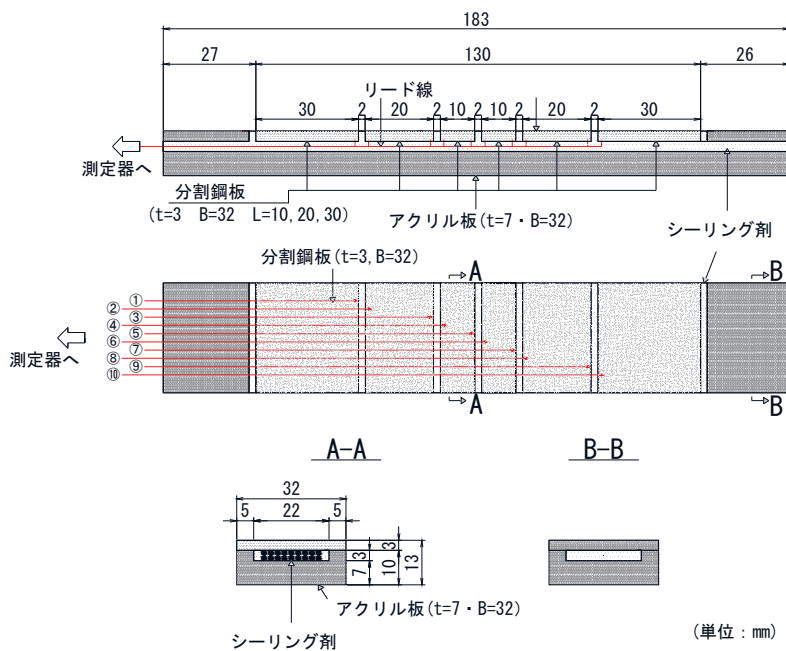


図-4 分割鋼板試験体の形状寸法

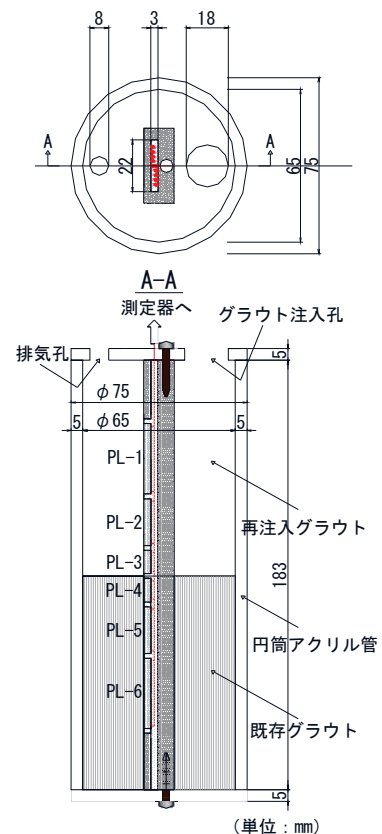
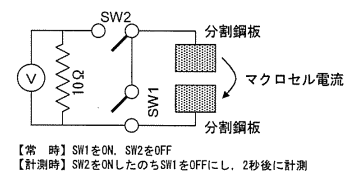


図-5 分割鋼板試験体のセット図

(2) マクロセル電流の測定方法⁷⁾

マクロセル電流はリレースイッチと, プログラム改造を施した静ひずみ計を用いた。リレースイッチは常時短絡してあり, 測定時のみシャント抵抗 (抵抗値: 10 Ω) に電流が流れるようにした。測定要領図を図-6に示す。なお, マクロセル電流密度 (α) は, 式(4)に示すように, 対象とする鋼板の両側から流入・流出する電流Aを合計して, 鋼板要素の表



【常時】SW1をON, SW2をOFF
【計測時】SW2をONしたのちSW1をOFFにし, 2秒後に計測

図-6 測定要領図

面積 (S) で除することにより算定した。

$$\alpha_i = \frac{A_{i-1} - A_i}{S_i} \dots \text{式(4)}$$

ここに、 α_i : PL_i のマクロセル電流 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

A_i : PL_i の電流量 (μA)

S_i : PL_i の表面積 (cm^2)

(3) 再注入グラウトの配合および試験水準

既設部グラウトの塩分量の設定は、既設グラウトから採取した塩分量測定事例³⁾で、a) シース内からの水滲出位置で最大10kg/m³程度であったこと、b) 排水管損傷による漏水位置で20kg/m³を超過していたことより、本試験では10kg/m³と30kg/m³の2水準とした。なお、Type I は現行基準で規定されるグラウト内の最大塩分量とした。

再注入グラウトは、既設シース内が既設グラウトにより空隙が減少して、再注入グラウトの充填が困難になることを想定し、極細部への充填性に優れる超低粘性タイプをベースとし、亜硝酸リチウム40%水溶液、CA₂を混入した。亜硝酸リチウム40%水溶液の混入量は、再注入グラウトとしてのフレッシュ性状を損なわず、かつ、ブリーディングが生じない最大値となる144kg (亜硝酸塩50kg/m³) とした。なお、亜硝酸塩量 (50kg/m³) により固定化される塩分量は、モル比 (NO₂⁻/CL⁻) を0.6とすると、55.8kg/m³となる。CA₂の混入量は、断面修復材としてCA₂を混入した実験⁶⁾にて、マクロセル腐食の抑制が確認されているセメント質量の5%および10%とした。なお、文献⁶⁾の「塩化物イオンの固定化の上限值とCA₂の単位量の関係」より、今回の実験での混入量に対する塩化物イオンの固定化の上限值は、(5%→5.6kg/m³, 10%→10.7kg/m³) となる。表-5に再注入グラウトの配合を、表-6に試験水準を示す。

(4) マクロセル電流密度の測定結果

試験体は既設グラウト部 (旧グラウト部) の施工後21日後に、再注入グラウトを充填した。その後、新グラウト充填後5日後に脱型し、材齢26日まで恒温槽 (40°C98%) で養生、材齢56日で20°C98%に変更して養生を継続している。図-7, 8に、測定結果を示す。なお、プラス側電流はアノード反応を、マイナス側電流はカソード反応を示し、アノード反応が腐食傾向となる。

表-5 グラウト配合

	W/C	超低粘性 グラウト材	W	混和材 上段:種別 下段:kg
	%	kg	kg	---
Type I ~ III	43	1323.0	569.0	---
Type IV	43	1171.0	503.5	LiNO ₃ 40%水溶液 144.0
Type V	43	1259.0	568.4	CA ₂ (5%) 62.9
Type VI	43	1200.7	567.9	CA ₂ (10%) 120.1

表-6 試験水準

	既設部 塩分量 (kg/m ³)	充填不良部 再注入グラウトの仕様	備考
Type I	0.3	---	健全
Type II	a	10	充填不良 状態残置
	b	30	
Type III	a	超低粘性 グラウト材	充填不良 +再注入
	b	超低粘性 グラウト材	
Type IV	a	超低粘性グラウト材 +亜硝酸リチウム	
	b	超低粘性グラウト材 +亜硝酸リチウム	
Type V	a	超低粘性グラウト材 +CA ₂ (5%)	
	b	超低粘性グラウト材 +CA ₂ (5%)	
Type VI	a	超低粘性グラウト材 +CA ₂ (10%)	
	b	超低粘性グラウト材 +CA ₂ (10%)	

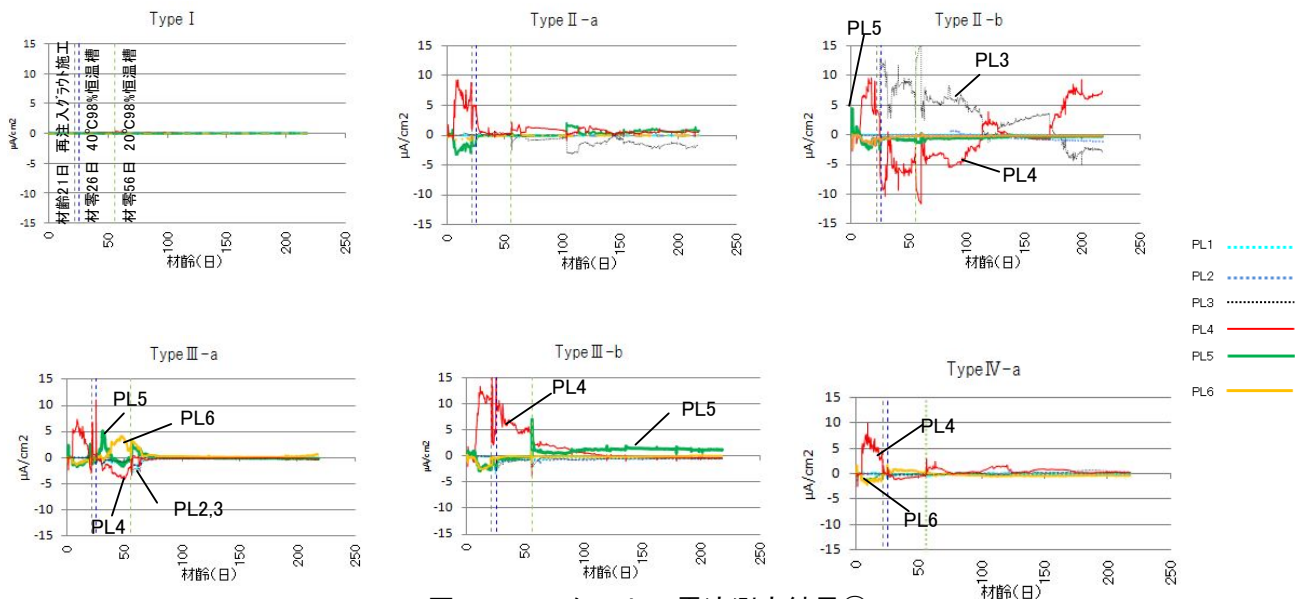


図-7 マクロセル電流測定結果(1)

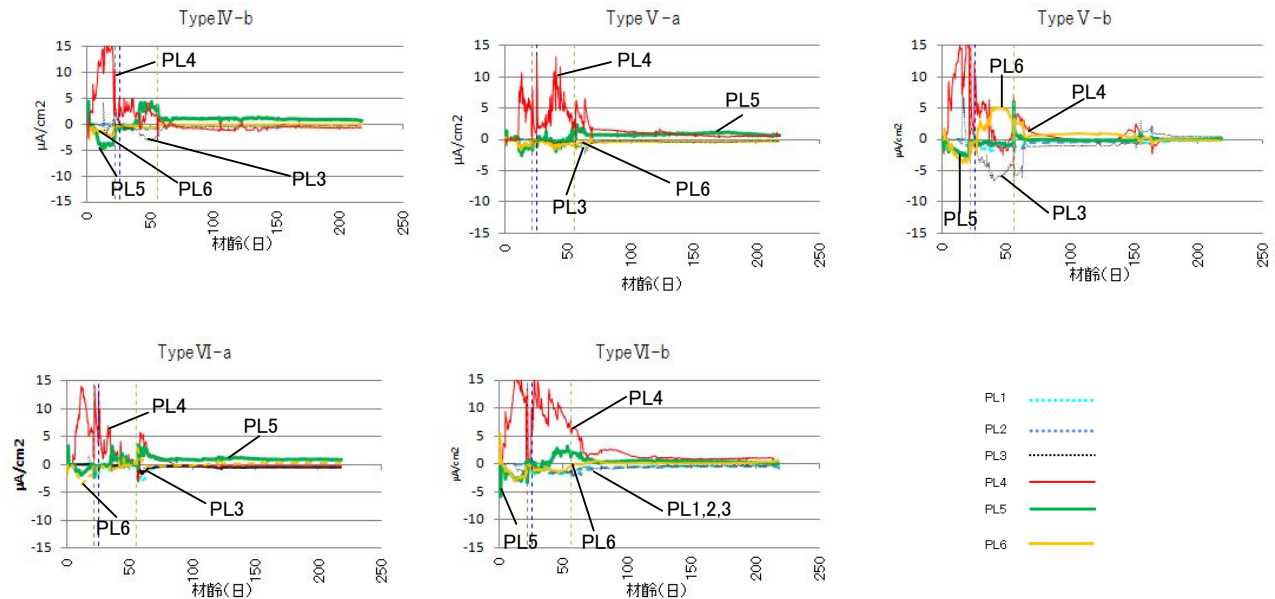


図-8 マクロセル電流測定結果②

既設グラウトの塩化物イオン含有量が 10kg/m^3 である場合、通常のグラウトを注入したType III-aの測定電流値が収束傾向であることより、マクロセルによる再劣化現象は、材齢217日時点では生じていないものと考えられる。

また、既設グラウトの塩化物イオン含有量が 30kg/m^3 である場合、Type IV-bは再注入直後より電流の変動が生じたのに対して、Type V-b, VI-bは、電流の変動は緩やかではあるが、材齢217日時点では、電流値が小さくなり収束傾向であることが伺える。ただし CA_2 については、塩化物イオン固定化に時間を要することが確認⁶⁾されていることより、今後、継続して計測を行う予定である。

4. まとめ

- ①真空法による空洞量推定：漏気の影響を受ける条件であっても、本試験条件では10%以内の精度での空洞量推定が可能であった。今後、さらに漏気程度の激しいケースにおける適用性を検証する。
- ② CA_2 による再劣化防止：塩化物イオン含有量が 30kg/m^3 のケースでの計測の結果、TYPE IIIとTYPE IV～VIを比較すると、マクロセル腐食に対する抑制効果が確認できる。今後、計測を継続する。

参考文献

- 1)三浦尚, 西川和廣, 見波潔, 上阪康雄: 暮坪陸橋の塩害による損傷と対策-(2)PC鋼材の腐食とその補強対策, 橋梁と基礎, pp37-40, 1993.12
- 2)小林憲一, 大平英生, 登石清隆, 羽田伸介: 妙高大橋のPCケーブル破断調査と対策, 橋梁と基礎, Vol45, No.9, 2011.9
- 3)鴨谷知繁, 岡林秀勝, 飯塚崇史, 飯田明弘: グラウト充填不足を有するPC橋の長寿命化—亜硝酸リチウム水溶液を用いた新技術の適用—, プレストレストコンクリートVol56, No1, Jan.2014
- 4)井隼俊也, 崎谷和也, 渡瀬博, 藤原規雄: 既設ポストテンションPCT桁の補修について—グラウト再注入および支承取替—, プレストレストコンクリートVol55, No6, Nov.2013
- 5)(公財)鉄道総合技術研究所: PCグラウトの再注入等補修マニュアル(案) 平成14年8月
- 6)宮口克一: 塩素固定化材を用いた断面修復材と犠牲陽極材を併用した断面修復工法の鉄筋防食性能に関する研究, 京都大学大学院工学研究科専攻博士論文
- 7)野島昭二, 徳光卓, 山田一夫, 宮川豊章: グラウト中の間げきが鋼材腐食性に与える影響に関する実験的研究(供試体暴露3年半経過後), プレストレストコンクリート技術協会, 第17回シンポジウム論文集, pp391～pp396, 2008.11